

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ

И. Г. БАСОВ, Ю. Н. ЛУЗГИН

(Представлена кафедрой горных машин, рудничного транспорта и горной механики)

Горные породы, а также строительные материалы и мерзлые грунты состоят из твердых минеральных зерен, сцементированных между собой. При испытании образцов горных пород и строительных материалов на одноосное сжатие в них вызываются напряжения, которые можно представить в виде направленных определенным образом усилий. Но для этого необходимо принять близкую к действительности наглядную модель материала.

Большинство материалов можно представить в виде схемы, в которой роль зерен выполняют шарики. Подобная теоретическая схема (Б. В. Дерягин, 1963) применялась при обосновании законов внешнего трения и дала хорошие результаты. Схемы строения материалов можно представить состоящими из равно- или разновеликих шаров. Для разновеликих шаров теоретически различают шесть способов укладки в зависимости от взаимного расположения их центров. При наименее плотной укладке шаров с радиусом r центры их располагаются в вершинах куба, а при наиболее плотной — в вершинах ромбоэдра. Для разновеликих шаров число возможных способов укладки значительно больше.

В естественных и искусственных каменных материалах при выбранной схеме разновеликих шаров наиболее вероятной является плотная их укладка. Графически представить объемную укладку довольно громоздко, поэтому для простоты и удобства дальнейшего изложения существа вопроса можно принять плоское изображение расположения шариков (рис. 1), которое в вертикальной плоскости дает наглядное представление принятого способа укладки.

Для того чтобы не загромождать схему действующими между шариками силами адгезии и трения, выделим только усилия P' , которые появляются под действием равномерно распределенной нагрузки P . Распределение усилий P' и их реакций R' внутри образца справедливо лишь при небольших нагрузках, т. е. в тех случаях, когда силы трения на его торцах еще не оказывают существенного влияния на перераспределение напряжений. Поскольку шарики отдельных слоев передают нагрузку через точечные контакты, усилие P' не совпадает по направлению действия с нагрузкой P и может быть найдено из выражения

$$P' = \frac{P}{n \cos \alpha}, \quad (1)$$

где n — число контактов между шариками по направлению действия сил;

α — угол, под которым действует усилие P' .

Величина угла α зависит от способа укладки шаров при равных их размерах. При плотной укладке равновеликих шаров $\sin \alpha = 0,5$, т. е.

угол α не зависит от их размеров и всегда равен примерно $\frac{\pi}{6} \text{ рад} (30^\circ)$.

Для этого случая в соответствии с формулой (1) $P' = 0,578 P$. Для образцов, состоящих из разновеликих шаров, на величину угла α будут влиять и размеры соприкасающихся шаров.

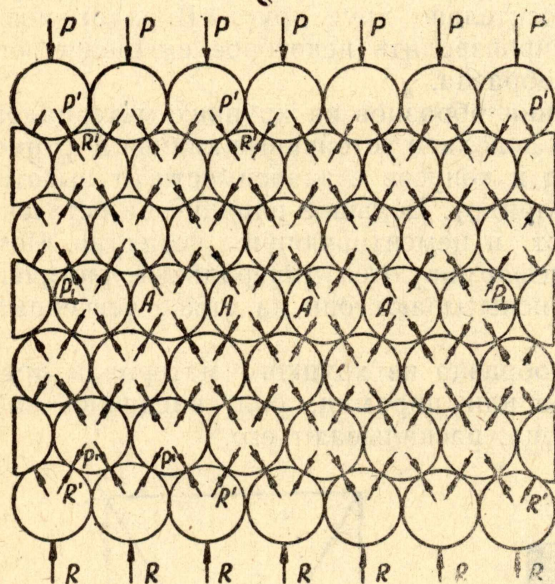


Рис. 1. Схема сил, действующих на образец при его сжатии

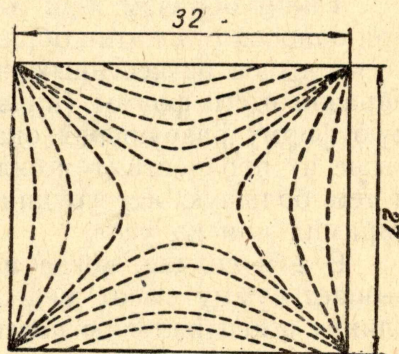


Рис. 2. Изолинии главных касательных напряжений в сжимаемом образце из оптически активного материала (по В. Ф. Трумбачеву и Е. В. Мельникову)

По мере увеличения нагрузки и начала деформации на торцах образца возникают силы трения, направленные к центру опорной плоскости, которые создают эффект обоймы, отмеченный многими исследователями (Фелль, Скрамтаев, Геллер, Рош, Тейлоу и др.). Указанные силы трения вызывают перераспределение усилий в образце материала. В результате усилия, передаваемые во внутрь образца шариками, находящимися на периферии торцевых поверхностей образца, будут значительно большими, чем усилия, направленные к внешней стороне. Поэтому напряжения в центре торцевых поверхностей получаются максимальными и снижаются по направлению к периферии торцов. Это положение хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований К. В. Руппенейта и Г. Л. Фисенко.

Перераспределение сил на торцах образца вызывает в свою очередь перераспределение сил и в его центральной части. В каждом последующем от торца ряду (рис. 1) будет все меньшее число шариков находиться в объемном напряженном состоянии. В центре под действием сил сжатия образуется зона максимальных напряжений и поскольку, как показали опыты (Б. Г. Скрамтаев, Н. А. Попов, Н. А. Герливанов, Г. Г. Мудров и др.), прочность зерен значительно выше прочности цементирующего вещества, то происходит вклинивание одних между другими. При этом все шарики, участвующие в перегруппировке,

частично деформируются, а часть их стремится быть вытесненными в боковые стороны. В связи с этим в образце возникают значительные касательные напряжения (рис. 2).

В процессе сжатия цилиндрические образцы из вязких материалов принимают бочкообразную форму, а в результате разрушения кубических образцов из хрупких материалов образуются две усеченные пирамиды, сложенные вершинами (рис. 3). Такая разница в форме разрушенных образцов получается вследствие того, что в хрупких материалах связь между частичками довольно жесткая и нарушается также при небольших их перемещениях относительно друг друга. В пластичных материалах эта связь позволяет производить некоторое смещение частиц без нарушения целостности образца.

Таким образом, при разрушении образцов из хрупких материалов при одноосном сжатии образуются довольно устойчивые клинья в форме усеченных и неусеченных пирамид и конусов в зависимости от высоты образца и его формы (призма, цилиндр). Большое влияние на остаточную форму разрушения оказывают и цементирующие вещества. Чем выше их прочность, тем сильнее деформируются минеральные частички и тем большую перегруппировку испытывают они на стыке усеченных пирамид или конусов.

В том случае, когда высота образца из хрупкого материала превышает сумму высот двух конусов или пирамид, они, внедряясь как клинья в центральную часть образца, раскалывают его.

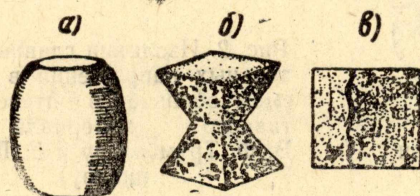


Рис. 3. Характерные формы разрушения образцов при одноосном сжатии: а) цилиндрического из вязких материалов; б) кубического из хрупких материалов; в) кубического из хрупких материалов при смазывании парафином торцевых поверхностей

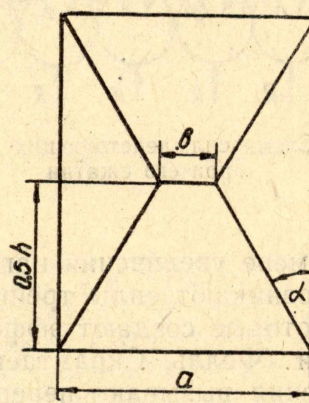


Рис. 4. Расчетная схема

Чем меньше отношения высоты образца h к стороне его основания a или диаметру d , тем больше части всего объема будут представлять устойчивые клинья в виде усеченных пирамид или конусов и тем прочнее будет образец. Примерно аналогичный вывод приводит М. М. Протодьяконов (1963): при постоянной высоте образца и увеличении его диаметра наличие радиальных сил трения на торцах образца приводит к увеличению прочности в центральной части торцов и к повышению средней прочности образцов.

Анализируя механизм разрушения образцов при одноосном сжатии и данные экспериментальных исследований по их разрушению в зависимости от соотношения $\frac{h}{a}$ или $\frac{h}{d}$, мы приходим к выводу, что прочность образцов R , Мн/м^2 (кг/см^2) обратно пропорциональна боковой поверхности усеченных или неусеченных пирамид или конусов, т. е. уплотненным и довольно устойчивым клиньям. Указанная поверхность соответствует вновь образованной поверхности у образ-

цов из хрупких материалов и может быть выражена через известные величины a (d) и h .

Боковая поверхность правильной усеченной пирамиды равна (рис. 4)

$$F_{\pi} = 2(a + b)L, \quad (2)$$

где b — длина стороны меньшего основания пирамиды;

L — апофема.

Из рис. 4 находим, что

$$b = a - h \operatorname{tg} \alpha; \quad L = \frac{0,5 h}{\cos \alpha}.$$

Подставляя эти значения в формулу (2), найдем

$$F'_{\pi} = \frac{(2a - h \operatorname{tg} \alpha) h}{\cos \alpha}.$$

Полная вновь образованная поверхность при разрушении образца кубической формы одноосным сжатием и $\alpha = \frac{\pi}{6} \text{ рад} (30^\circ)$ может быть найдена из выражения

$$F_{\pi} = 2,3 (2a - 0,577 h) h \quad (3)$$

и для образцов цилиндрической формы

$$F_{\kappa} = 1,81 (2d - 0,577 h) h. \quad (4)$$

Принимая различные отношения $\frac{h}{a}$ и $\frac{h}{d}$ и выражая

h через a и d , по формулам (3) и (4) найдем поверхности F_{π} и F_{κ} (табл.). Для удобства сравнения расчетных данных с экспериментальными выразим эти поверхности в относительных единицах, приняв значения $F_{\pi 1}$ и $F_{\kappa 1}$ при $h = a$ и $h = d$ соответственно за 100 % (табл.). Из формул (3) и (4)

также следует, что при $\frac{h}{a} = \frac{h}{d} \frac{F_{\kappa}}{F_{\kappa 1}} = \frac{F_{\pi}}{F_{\pi 1}}$.

Сравнение зависимостей $\frac{F}{F_1} = \frac{\sigma}{\sigma_1} = f\left(\frac{h}{a}, \frac{h}{d}\right)$, полученных экспериментально различными исследователями (рис. 5), с расчетными (табл., рис. 5, пунктирные линии) показывает достаточно полное их совпадение. Из рис. 5 следует, что изменение относительной прочности образцов в зависимости от соотношения их геометрических параметров $\left(\frac{h}{a} \text{ и } \frac{h}{d}\right)$ имеет одинаковую закономерность для всех рассматриваемых материалов.

Некоторые авторы (С. П. Тимошенко, 1965) считают, что истинное сопротивление сжатию хрупких материалов, например бетона, можно получить, исключив или уменьшив влияние трения на опорных поверхностях образца. Для этой цели А. Фелль покрывал опорные поверх-

Т а б л и ц а

$h = fd$	F_{κ}	F_{π}	$\frac{F_{\kappa}}{F_{\kappa 1}} = \frac{F_{\pi}}{F_{\pi 1}}$
$h = 0,25 d$	$0,84 d^2$	$1,07 a^2$	3 06
$h = 0,35 d$	$1,14 d^2$	$1,45 a^2$	2 28
$h = 0,4 d$	$1,28 d^2$	$1,63 a^2$	2 02
$h = 0,5 d$	$1,55 d^2$	$1,97 a^2$	1,66
$h = 0,6 d$	$1,79 d^2$	$2,28 a^2$	1,43
$h = 0,8 d$	$2,22 d^2$	$2,82 a^2$	1,16
$h = 1,0 d$	$2,57 d^2$	$3,27 a^2$	1,00
$h = 1,2 d$	$2,83 d^2$	$3,6 a^2$	0,91
$h = 1,4 d$	$3,02 d^2$	$3,84 a^2$	0,85
$h = 1,6 d$	$3,12 d^2$	$3,97 a^2$	0,825

ности парафином и нашел, что предел прочности при этом значительно уменьшается.

Б. Г. Скрамтаев, Н. А. Попов, Н. А. Герливанов, Г. Г. Мудров (1952) считают, что при таких условиях испытания прочность кубиков снижается на 50%. Если снова обратиться к шариковой схеме изображения испытываемого образца, то механизм разрушения последнего при одноосном сжатии и отсутствии сил трения на опорных поверхностях можно представить следующим образом. Минеральные зерна-шарики торцевых слоев под действием сжимающих усилий вклиниваются

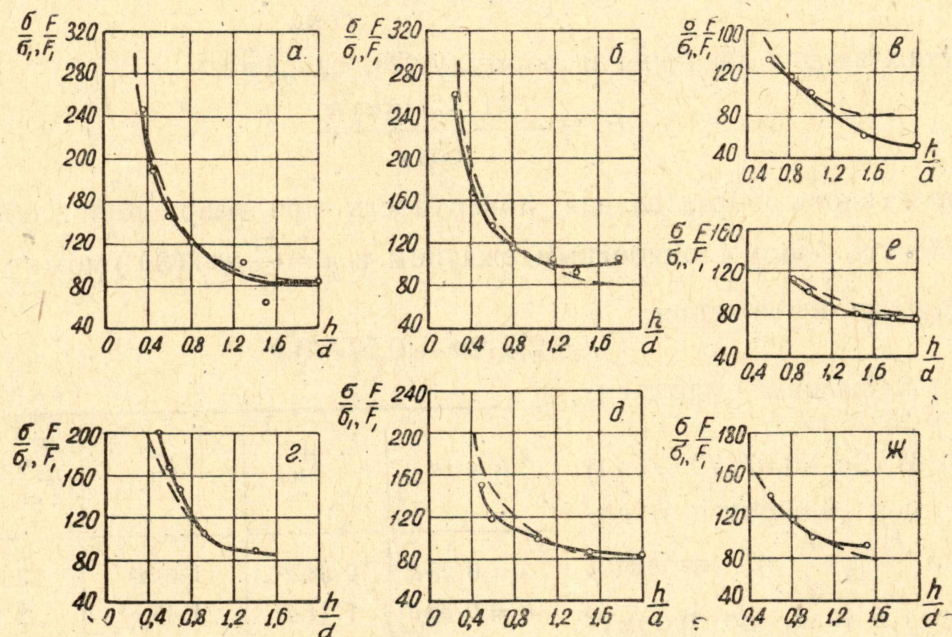


Рис. 5. Зависимость относительной прочности и отношения вновь образуемых поверхностей при раздавливании образцов от $\frac{h}{a}$ или $\frac{n}{a}$ для: а) железистого кварцита (по Л. И. Барону и др.); б) каменных материалов (по Л. И. Барону и др.); в) антрацита (по В. Ш. Замтарадзе); г) апатитовой руды (по Л. И. Барону и др.); д) каменной соли (по Г. Н. Кузнецову); е) гипса (по Л. И. Барону и др.); ж) бетона (по П. Ф. Шубенкину)

между шариками соседних слоев. Создается напряженное состояние вдоль образца и раскалывание его происходит по направлению действия сжимающих усилий. Поэтому при разрушении образца получаются отдельные пластинки (рис. 3), параллельные одной из боковых граней. Поскольку хрупкий материал значительно хуже сопротивляется раскалыванию по сравнению со сжатием, то и предел прочности на сжатие при таком условии испытания будет меньшим. И его значение будет зависеть от высоты раздавливаемого образца.

Из изложенного в настоящей работе материала можно сделать следующие выводы:

1. Для наглядного представления механизма разрушения хрупких материалов при одноосном сжатии можно пользоваться шариковой схемой замещения образца. Картина описываемого с помощью предлагаемой схемы замещения механизма разрушения подтверждается результатами экспериментов, полученными различными исследователями на реальных материалах.

2. Выявленная зависимость между относительной прочностью материала и геометрическими параметрами испытываемых образцов на

одноосное сжатие дает хорошие результаты при $\frac{h}{a} = \frac{h}{d} = 0,6 \div 1,6$. Это позволяет осуществлять сопоставление прочности материалов при испытании образцов различной высоты путем пересчета прочности на стандартный образец.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. В. Дерягин. Что такое трение. Изд. АН СССР, М., 1963.
2. Б. Г. Скрамтаев, Н. А. Попов, Н. А. Герливанов, Г. Г. Мудров. Строительные материалы. Промстройиздат, М., 1952.
3. С. П. Тимошенко. Сопротивление материалов, т. II, Изд. «Наука», М., 1965.
4. Л. И. Барон. Экспериментальное определение коэффициентов крепости горных пород по шкале М. М. Протодяконова путем испытания буровых кернов на раздавливание. Разрушение углей и пород. Углетехиздат, М., 1958.
5. М. М. Протодяконов. Метод определения прочности горных пород на одноосное сжатие. Механические свойства горных пород. Изд. АН СССР, М., 1963.
6. А. И. Берон, А. С. Казанский, Б. М. Лейбов, Е. З. Позин. Резание угля. Госгортехиздат, М., 1962.
7. Г. Н. Кузнецов. Механические свойства горных пород. Углетехиздат, М., 1947.
8. Б. Г. Скрамтаев, М. Ю. Лещинский. Испытание прочности бетона. Изд. лит. по строительству, М., 1964.